

# BLDC 모터의 홀센서 정렬 오차 보상 기법

박도현<sup>1</sup>, 이동춘<sup>1</sup>, 이형근<sup>2</sup>  
 영남대학교 전기공학과<sup>1</sup>, 엘씨텍(주)<sup>2</sup>

## Compensation Scheme of Effect of Hall Sensor Misalignment for BLDC Motors

Do Hyeon Park<sup>1</sup>, Dong Choon Lee<sup>1</sup>, Hyong Gun Lee<sup>2</sup>  
 Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University<sup>1</sup>, LC-TEK Co., Ltd.<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 BLDC 모터의 홀 센서의 정렬 오차를 검출하고 보상하는 기법을 제안한다. 합성된 홀 센서 신호를 이용하여 고조파 분석을 수행하여 기본파와 성분의 크기를 획득한다. 오차가 없는 경우의 기본파와 성분의 크기와 비교하여 정렬 오차를 검출하고 보상한다.

### 1. 서 론

BLDC 모터는 회전자가 일정 방향으로 회전하도록 회전자에 위치에 따라 전류를 흘릴 고정자 권선을 바꿔서 회전자에 힘이 연속적으로 발생시켜 구동한다<sup>[1]</sup>. 회전자의 위치를 알기 위해서는 위치 센서가 필수적이며 일반적으로 정밀도가 뛰어나지만 가격이 비싼 광학식 엔코더 대신 저렴한 자기식 홀 센서가 주로 사용된다.

홀 센서는 각 상의 역기전력의 영점에 대해 60도, 상호간 120도의 전기각을 가지도록 모터에 부착된다. 하지만, 구조적 결함이나 제조 과정의 문제로 홀센서의 정렬에 오차가 존재하면 정확한 위치에서 전류 전환이 이루어지지 않아 토크 리플이 발생하게 된다. 그 결과 속도 리플이 발생하여 속도 제어 성능이 저하되고, 진동과 소음이 발생한다<sup>[2]</sup>. 따라서 홀센서 정렬 오차를 검출하고 이를 보상하는 기법이 필요하다.

본 논문에서는 3개의 홀 센서의 합성 신호를 이산 푸리에 변환을 통해 고조파 분석을 하고 이를 이용하여 BLDC 모터의 홀센서 정렬 오차를 검출하고 보상하고자 한다.

### 2 본 론

#### 2.1 BLDC 모터 제어 시스템 구성

그림 1은  $\Delta$  결선의 3상 BLDC 모터와 제어 시스템의 구성도이다.  $V_{dc}$ 는 입력 직류 전압이고  $Q_1$ 에서  $Q_6$ 은 인버터를 구성하는 스위치이며  $i_{a\_line}$ ,  $i_{b\_line}$ ,  $i_{c\_line}$ 은 선전류이다. 그리고  $i_{a\_ph}$ ,  $i_{b\_ph}$ ,  $i_{c\_ph}$ 는 모터 상전류,  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $e_{abc}$ 는 각각 상 저항, 인덕터 그리고 역기전력을 뜻한다.

그림 2에 2상 여자 제어기법이 적용된 BLDC 모터의 역기전력과 상전류 및 선전류의 파형을 보인다. 홀 센서는 정렬오차가 존재한다.  $\theta_{mis,abs}$ 는 a상 홀센서의 이상적인 센서에 대한 절대 오차이고  $\theta_{mis,ab}$ 와  $\theta_{mis,ca}$ 는 실제  $H_a$ 에 대한  $H_b$ 와  $H_c$ 의 상대 오차이다.  $H_b$ 와  $H_c$ 가 이상적인 위치보다 앞서면  $\theta_{mis,ab}$ ,  $\theta_{mis,ca}$ 는 음의 값을 가지고, 뒤지면 양의 값을 가진다. 이러한 정렬 오차가 발생하면 전류 제어 성능에 나쁜 영향을 미치고 토크 리플이 발생한다<sup>[2]</sup>.

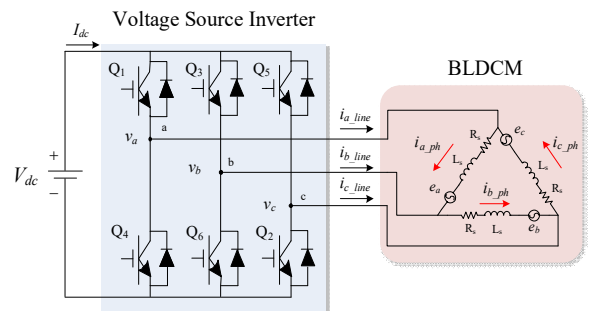


그림 1 BLDC 모터 제어 시스템 구성도

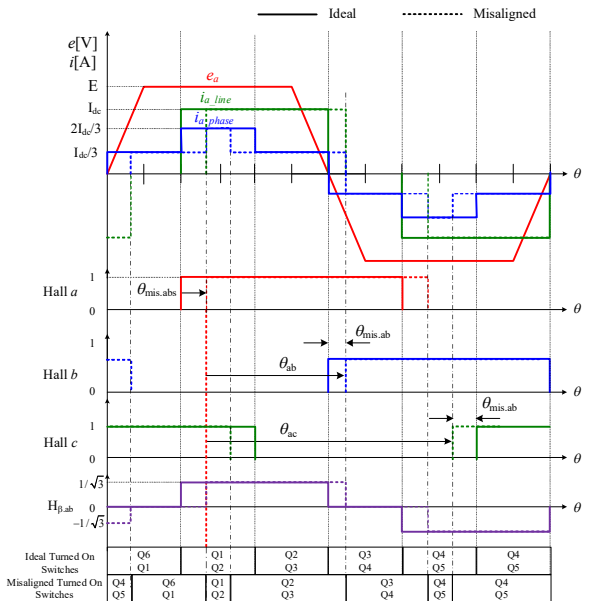


그림 2 홀 센서의 정렬오차가 있는 경우의 전압 및 전류

#### 2.2 홀 센서 신호의 고조파 분석 및 보상

한 주기 동안의  $a, b$ 상의 홀 센서 신호를 고조파로 표현하면 식 (1)과 같이 표현되며 여기서  $\theta_{ab}$ 는 홀센서 사이의 전기각 위상차를 의미한다.

$$H_a = 0.5 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin n\omega t}{n} \quad (1)$$

$$H_b = 0.5 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t - \theta_{ab})}{n} \quad (2)$$

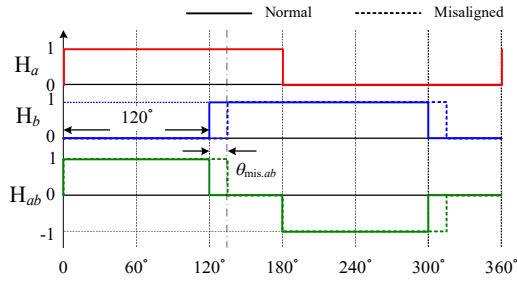


그림 3 홀 센서 신호

$$H_{ab} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{n\theta_{ab}}{2}\right) \cos\left[n\left(\omega t - \frac{\theta_{ab}}{2}\right)\right]}{n} \quad (3)$$

$$|H_{ab}| = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\theta_{ab}}{2} \quad (4)$$

$$\theta_{mis.ab} = 120 - \frac{180}{\pi} \times 2 \sin^{-1}\left(\frac{\pi}{4} |H_{1st.ab}|\right) [\text{deg}] \quad (5)$$

그림 3에서  $H_a$ 와  $H_b$ 는 각각  $a$ 상과  $b$ 상 홀센서 신호이고  $H_{ab}$ 는  $H_a$ 와  $H_b$ 의 차이이다.  $H_{ab}$ 는 식 (2)와 같이 표현되고, 식 (3)으로부터 기본파의 크기를 얻을 수 있다. 그리고 이는  $\theta_{ab}$ 에 비례한다.

이상적으로  $\theta_{ab}$ 는 120도이므로 식 (4)와 같이 식 (3)의 역함수를 120에 빼면  $a$ 상 홀센서에 대한  $b$ 상 홀센서의 정확한 상대 오차를 얻을 수 있다. 여기서  $H_{ab}$ 의 기본파 크기  $H_{1st.ab}$ 는  $a$ 상 홀센서의 한 주기에 대하여 식 (5)의 이산 푸리에 변환을 통해 얻으며 제 2 고조파 이상의 성분은 사용되지 않기 때문에 기본파에 대해서 1회만 수행하면 된다.

기준이 되는  $a$ 상 홀센서의 오차는 상대 오차만으로 보상이 어렵다. 그러므로 기준상 홀 센서의 오차는 역기전력이 영점을 지나는 지점을 이용하여 검출한다. 전압 센서를 이용하여 검출한 역기전력이 음에서 양으로 지나는 지점과  $a$ 상 홀센서가 0에서 1로 전환되는 지점의 간격은 60도가 되어야 한다. 따라서  $a$ 상 역기전력의 영점을 기준으로 위상차를 획득하고 60도에 빼주어  $a$ 상 홀센서의 오차를 검출한다.

위와 같이 얻어진 정렬 오차는 즉시 보상될 수 있으므로 두 번째 회전 구간에서는 보정된 홀센서 신호를 기반으로 하여 인버터를 제어한다.

### 3. 시뮬레이션

제안하는 정렬 오차 검출 및 보상 기법의 성능을 검증하기 위해 PSIM을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 모터의 파라미터를 표 1에 보인다.

3상 홀센서의 정렬 오차는 이상적인 홀센서에 대하여 각각 9.9°, 14.2°, 6.2°이고 상대 정렬 오차  $\theta_{mis.ab}$ ,  $\theta_{mis.ca}$ 는 각각 24.1°, 16.1°이다. PSIM에서 BLDC 모터를 모델링하여 구형하고 룩업 테이블을 사용해서 실제 역기전력을 고려하였다.

모터는 부하가 0.24[Nm]일 때 구동 속도 4000[rpm]으로 제어된다. 처음으로 역기전력이 음에서 양으로 변한 시점이 먼저 저장되고  $H_a$ 의 값이 0에서 1로 변할 때  $a$ 상 홀센서의 오차 검출이 수행되고 3상 홀센서의 샘플링이 시작된다. 그 후 다시  $H_a$ 의 값이 0에서 1로 변하는 순간 샘플링이 종료되고 정렬 오차의 계산이 수행되어 다음 주기부터는 보상된 홀센서 신호를 기반으로 인버터가 제어된다.

표 1 모터 파라미터

Power	250[W]
Rated speed	4000[rpm]
Rated voltage	24
R	1.8[Ω]
L	705[uH]
Number of poles	6
BEMF constant	0.24[V/rad/sec]
DFT sampling frequency	44[kHz]

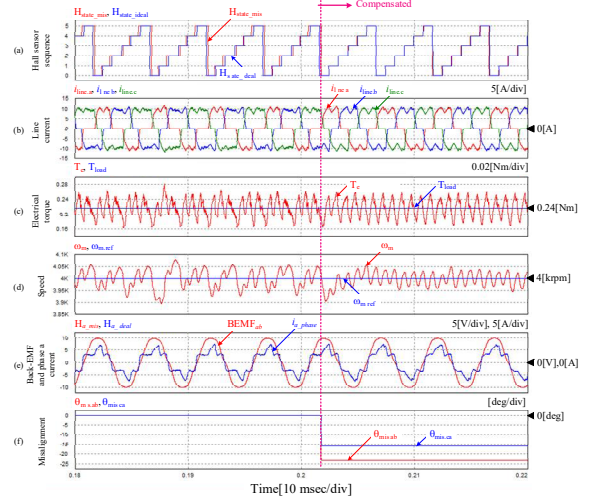


그림 4 홀 센서의 정렬 상태에 따른 모터 출력

그림 4는 보상 전후의 모터 출력 파형이다. (a)는 홀센서 시퀀스, (b)는 선전류, (c)는 토크, (d)는 속도, (e)는 역기전력과 상전류, (f)는 제안된 기법에 의해 검출된 상대 오차각이다. 보상 전에는 전류가 왜곡되고 큰 토크 리플이 발생하여 속도 리플이 컸으나 보상 후에는 홀센서 시퀀스도 각 구간의 간격이 일정하게 되었고 전류의 왜곡이 사라지면서 토크 리플과 속도 리플이 모두 감소되었음을 알 수 있다. 토크 리플은 0.11[Nm]에서 0.06[Nm]로, 속도 리플은 300[rpm]에서 134[rpm]으로 각각 20%, 4%만큼 감소되었다. 검출된  $a$ 상에 대한  $b$ 상과  $c$ 상의 상대 오차각은 각각 23.8°, 15.6°이고 실제 오차와의 차이는 0.3°, 0.5°이다.

### 결론

본 논문에서는 홀 센서의 정렬 오차를 고조파 분석을 통해 검출하고 이를 보상하는 기법을 제시하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] 김상훈, "모터제어 DC, AC, BLDC," 북두출판사, 2014
- [2] N. Samoylenko, H. Qiang, and J. Jatskevich, "Dynamic performance of brushless DC motors with unbalanced Hall sensors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 3, pp. 752-763, Sep. 2008.
- [3] 박제욱, 김중훈, 김장목, "역기전력 추정법을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 홀센서 상전류 전환시점 보상 방법," 전력전자학회 논문지, 제17권, 제3호, pp. 246-251, 2012, 06.
- [4] J.S. Park, J.H. Choi and J. Lee, "Compensation Method of Position Signal Error with Misaligned Hall Effect Sensors of BLDC Motor," JEET, Vol. 11, no. 4, pp. 889-897, Jul. 2016